

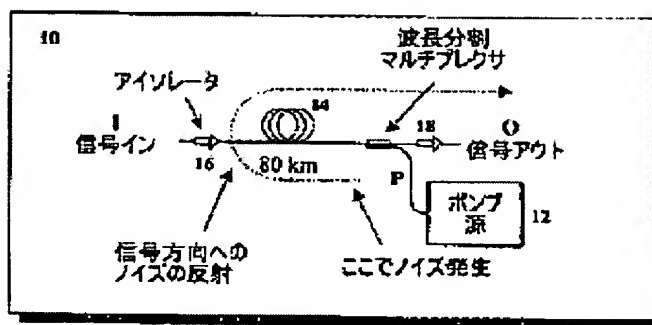
RAMAN AMPLIFICATION OPTICAL SYSTEM REDUCING FOUR-WAVE MIXING EFFECT

Patent number: JP2001343673
Publication date: 2001-12-14
Inventor: HANSEN PER BANG; LEE ROBERT B; PARK SEO Y;
REED WILLIAM ALFRED; STENTZ ANDREW J
Applicant: LUCENT TECHNOLOGIES INC
Classification:
- international: **G02F1/35; H01S3/06; H01S3/30; G02F1/35; H01S3/06;
H01S3/30; (IPC1-7): G02F1/35; G02B6/16; H01S3/06;
H01S3/30**
- european:
Application number: JP20010057526 20010302
Priority number(s): US20000186793P 20000303

Report a data error here

Abstract of JP2001343673

PROBLEM TO BE SOLVED: To avoid the instability of modulation and the effect of the four-wave mixing in a Raman-amplification optical transmission system. **SOLUTION:** A transmission fiber which is used in the Raman-amplification optical transmission system is constituted so as to exhibit specific characteristics for restricting the instability of modulation and the four-wave mixing in an amplification area and, as a result, noise constituting elements existing in the transmission system are reduced.



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2001-343673

(P 2 0 0 1 - 3 4 3 6 7 3 A)

(43) 公開日 平成13年12月14日 (2001. 12. 14)

| (51) Int. Cl. ⁷ | 識別記号 | F I | テーマコード (参考) |
|----------------------------|------|-----------|-------------|
| G02F 1/35 | 501 | G02F 1/35 | 2H050 |
| G02B 6/16 | | G02B 6/16 | 2K002 |
| H01S 3/06 | | H01S 3/06 | B 5F072 |
| 3/30 | | 3/30 | Z |

審査請求 未請求 請求項の数16 O L (全11頁)

(21) 出願番号 特願2001-57526 (P 2001-57526)
(22) 出願日 平成13年3月2日 (2001. 3. 2)
(31) 優先権主張番号 60/186793
(32) 優先日 平成12年3月3日 (2000. 3. 3)
(33) 優先権主張国 米国 (U S)

(71) 出願人 596092698
ルーセント テクノロジーズ インコーポ
レーテッド
アメリカ合衆国. 07974-0636 ニュージャ
ーシー, マレイ ヒル, マウンテン アヴ
ェニュー 600
(72) 発明者 パー バング ハンセン
アメリカ合衆国 07760 ニュージャーク
イ, ラムソン, シェラトン レーン 4
(74) 代理人 100064447
弁理士 岡部 正夫 (外11名)

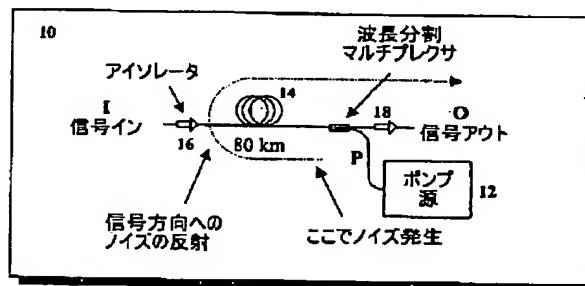
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 四波混合効果が削減されたラマン増幅光システム

(57) 【要約】

【課題】 ラマン増幅光伝送システムにおいて、変調の不安定性および四波混合の効果を回避すること。

【解決手段】 ラマン増幅光通信システムにおいて使用する伝送ファイバは、増幅領域における変調の不安定性および四波混合を制限する特定の特性を示すように構成されており、それによって伝送システムに存在する雑音構成要素を削減する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 ラマン増幅光伝送システムにおいて用いられる光ファイバであって、該伝送システムは、所定の波長範囲 $\lambda_{s1} \sim \lambda_{s2}$ で入力信号を提供する情報信号源を含み、所定の波長範囲 $\lambda_{p1} \sim \lambda_{p2}$ でラマン増幅ポンプを利用し、前記ファイバは、前記ポンプ波長範囲 $\lambda_{p1} \sim \lambda_{p2}$ において正ではないか1. 5 ps/nm-km よりも大きいかの何れかである値を示すように、所定の群速度分散を維持し、ゼロ分散周波数をポンプ周波数および信号周波数の平均値から離して維持することにより、ラマン増幅の領域における雑音構成要素を削減するように制御された、所定の群速度分散とゼロ分散波長とを示す、光ファイバ。

【請求項2】 前記光ファイバは、前記信号波長範囲 $\lambda_{s1} \sim \lambda_{s2}$ において -10 ps/nm-km および $+10 \text{ ps/nm-km}$ によって境界を定められた値を有する群速度分散を更に含む、請求項1に記載の光ファイバ。

【請求項3】 前記ポンプ波長範囲は $1430 \sim 1465 \text{ nm}$ として定められ、前記信号波長範囲は $1530 \sim 1565 \text{ nm}$ として定められている、請求項1に記載の光ファイバ。

【請求項4】 前記ポンプ波長範囲は $1465 \sim 1510 \text{ nm}$ として定められ、前記信号波長範囲は $1565 \sim 1610 \text{ nm}$ として定められている、請求項1に記載の光ファイバ。

【請求項5】 前記ポンプ波長範囲は $1430 \sim 1510 \text{ nm}$ として定められ、前記信号波長範囲は $1530 \sim 1610 \text{ nm}$ として定められている、請求項1に記載の光ファイバ。

【請求項6】 ラマン増幅光伝送システムにおいて用いられる光ファイバであって、該伝送システムは、所定の波長範囲 $\lambda_{s1} \sim \lambda_{s2}$ で入力信号を提供する情報信号源を含み、所定の波長範囲 $\lambda_{p1} \sim \lambda_{p2}$ でラマン増幅ポンプを利用し、前記ファイバは、前記ポンプ波長範囲 $\lambda_{p1} \sim \lambda_{p2}$ において正ではないか1. 5 ps/nm-km よりも大きいかの何れかである値を示すように、所定の群速度分散を維持することにより、ラマン増幅の領域における雑音構成要素を削減するように制御された前記所定の群速度分散を示す、光ファイバ。

【請求項7】 前記信号波長範囲 $\lambda_{s1} \sim \lambda_{s2}$ において -10 ps/nm-km および $+10 \text{ ps/nm-km}$ によって境界を定められた値を有する群速度分散を更に含む、請求項6に記載の光ファイバ。

【請求項8】 ラマン増幅光伝送システムにおいて用いられる光ファイバであって、前記伝送システムは、所定の波長範囲 $\lambda_{s1} \sim \lambda_{s2}$ で入力信号を提供する情報信号源を含み、所定の波長範囲 $\lambda_{p1} \sim \lambda_{p2}$ でラマン増幅ポンプを利用し、前記ファイバは、ゼロ分散周波数をポンプ周波数および信号周波数の平均値から離して維持することにより、ラマン増幅の領域における四波混合雑音構成要

素を削減するように制御された所定のゼロ分散波長を示す、光ファイバ。

【請求項9】 所定の波長範囲 $\lambda_{s1} \sim \lambda_{s2}$ で入力信号を提供する情報信号源と、所定の場所への光信号の伝送を提供するために、前記情報信号源の出力に連結された光伝送ファイバと、前記光伝送ファイバにおいて前記入力信号のラマン増幅を生成するような方法で、前記光伝送ファイバに連結されたラマン増幅ポンプであって、ポンプ源は所定の波長範囲 $\lambda_{p1} \sim \lambda_{p2}$ でポンプ波を供給し、前記ファイバは、前記ポンプ波長範囲 $\lambda_{p1} \sim \lambda_{p2}$ において正ではないか1. 5 ps/nm-km よりも大きいかの何れかである値を示すように、所定の群速度分散を維持し、ゼロ分散周波数をポンプ周波数および信号周波数の平均値から離して維持することにより、ラマン増幅の領域における雑音構成要素を削減するように制御された前記所定の群速度分散および前記ゼロ分散波長を示すラマン増幅ポンプとを含む、ラマン増幅光伝送システム。

【請求項10】 前記伝送ファイバは、前記信号波長範囲 $\lambda_{s1} \sim \lambda_{s2}$ において -10 ps/nm-km および $+10 \text{ ps/nm-km}$ によって境界を定められた値を有する群速度分散を更に含む、請求項9に記載のラマン増幅光伝送システム。

【請求項11】 前記ポンプ波長範囲は $1430 \sim 1465 \text{ nm}$ として定められ、前記信号波長範囲は $1530 \sim 1565 \text{ nm}$ として定められている、請求項9に記載のラマン増幅光伝送システム。

【請求項12】 前記ポンプ波長範囲は $1465 \sim 1510 \text{ nm}$ として定められ、前記信号波長範囲は $1565 \sim 1610 \text{ nm}$ として定められている、請求項9に記載のラマン増幅光伝送システム。

【請求項13】 前記ポンプ波長範囲は $1430 \sim 1510 \text{ nm}$ として定められ、前記信号波長範囲は $1530 \sim 1610 \text{ nm}$ として定められている、請求項9に記載のラマン増幅光伝送システム。

【請求項14】 所定の波長範囲 $\lambda_{s1} \sim \lambda_{s2}$ で入力信号を提供する情報信号源と、所定の場所への光信号の伝送を提供するために、前記情報信号源の出力に連結された光伝送ファイバと、前記光伝送ファイバにおいて前記入力信号のラマン増幅を生成するような方法で、前記光伝送ファイバに連結されたラマン増幅ポンプであって、ポンプ源は所定の波長範囲 $\lambda_{p1} \sim \lambda_{p2}$ でポンプ波を供給し、前記ファイバは、前記ポンプ波長範囲 $\lambda_{p1} \sim \lambda_{p2}$ において正ではないか1. 5 ps/nm-km よりも大きいかの何れかである値を示すように、所定の群速度分散を維持することにより、ラマン増幅の領域における雑音構成要素を削減するように制御された前記所定の群速度分散を示すラマン増幅ポンプとを含む、ラマン増幅光伝送システム。

【請求項15】 前記伝送ファイバは、前記信号波長範

囲 $\lambda_{s1} \sim \lambda_{s2}$ において -10 ps/nm-km および $+10 \text{ ps/nm-km}$ によって境界を定められた値を有する群速度分散を更に含む、請求項 14 に記載のラマン増幅光伝送システム。

【請求項 16】 所定の波長範囲 $\lambda_{s1} \sim \lambda_{s2}$ で入力信号を提供する情報信号源と、
所定の場所への光信号の伝送を提供するために、前記情報信号源の出力に連結された光伝送ファイバと、
前記光伝送ファイバにおいて前記入力信号のラマン増幅を生成するような方法で、前記光伝送ファイバに連結されたラマン増幅ポンプ源であって、該ポンプ源は所定の波長範囲 $\lambda_{p1} \sim \lambda_{p2}$ でポンプ波を供給し、前記ファイバは、ゼロ分散周波数をポンプ周波数および信号周波数の平均値から離して維持することにより、ラマン増幅の領域における四波混合雑音構成要素を削減するように制御された所定のゼロ分散波長を示すラマン増幅ポンプ源とを含む、ラマン増幅光伝送システム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、ラマン増幅光システムに関し、特に、変調の不安定性と四波混合効果の存在を削減するために所定の分散特性を有する、伝送ファイバの利用に関する。

【0002】

【従来の技術】ラマン増幅という主題は文献においてはよく知られている。誘導ラマン増幅は、1つまたは複数の光信号を搬送している光ファイバ内に強いポンプ波を送り込む、非線形の光学的工程である。石英ガラス・ファイバにおいては、ポンプ波長が、1500nmの周辺にある信号波長よりも約100nm短い場合に、ポンプは誘導ラマン散乱を介して信号を増幅するであろう。増幅が伝送ファイバ自体で発生するようになされている場合には、増幅器は「分散」増幅器と呼ばれる。IEEE Phot. Tech. Lett.、Vol. 9、1997、262ページに掲載の記事である、P. B. Hansen 他による著の「Capacity upgrades of transmission systems by Raman amplification」において説明されているように、かかる分散増幅は通信システムのパフォーマンスを改善することが分かっている。たとえば、情報信号に対して逆伝搬する方向で、ファイバの一端にポンプ波が送り込まれる場合には、この信号は、その信号対雑音比が容認できないレベルに低下する前に増幅されるであろう。かかる増幅器のパフォーマンスは、その効果的または効果的であるに等しい雑音指数およびそのオン/オフ利得で表されることが多い。効果的な雑音指数は、分散ラマン増幅器と同じ雑音パフォーマンスを達成するために、同等な後増幅器が有するであろう雑音指数として定義される（たとえば、Rayleigh scattering limitations in distributed Raman pre-amplifier s）、P. B. Hansen 他による著、IEEE P

hot. Tech. Lett.、Vol. 10、1998、159ページ参照）。実験的には、逆伝搬ラマン増幅を利用してスパンの雑音指数を計測し、次にそのスパンの受動損を差し引く（デシベルで）ことにより求めることができる。分散ラマン増幅器のオン/オフ利得は、ラマン・ポンプが「オン」である出力信号強度と、ラマン・ポンプが「オフ」である出力信号強度との差（デシベルでの）として定義される。

【0003】群速度および群速度分散の概念は、光ファイバの分野においてよく知られている。群速度は、光パルスが伝わる速度として定義され、一方、群速度分散は波長の関数としての群速度の変化として定義される。群速度分散Dは、 ps/nm-km で表されることが多い。したがって、これらの点から、光が光導波管（光ファイバなど）内を伝わっている場合には、群速度分散は、導波管が製造される材料だけではなく、光を導くのに用いられるインデックス構造の特定の設計にも左右される。導波管分散として知られる後者の寄与は、光ファイバの分散特性を大幅に変更するために用いることができる。この点に関する完全な説明は、Fiber-Optic Communication System, Agrawal, John Wiley & Sons, Inc.、1992、第2章に記載されている。

【0004】光ファイバの分散特性は、そのゼロ分散波長（ZDW）（群速度分散がゼロである波長）とその分散勾配（波長の関数としての群速度分散の変化）とによって表されることが多い。たとえば、標準的な単モード光ファイバ（SMF）は、石英ガラスの材料分散が殆どを占める分散を有するので、約1300nmのZDWと、 $0.07 \text{ ps/nm}^2\text{-km}$ の分散勾配を有する。

【0005】群速度分散の効果は、光通信システム、特にラマン増幅を採用している光通信システムのパフォーマンスに有害になり得る。たとえば、オン/オフ・キーイングを採用している通信システムにおいては、群速度分散はパルスを広げる場合があり、パルスをその隣接するビット・スロットに拡張して、それによって伝送された情報信号に誤りを導入する場合がある。この効果は、通信システム全体に、定期的に設けられる分散補償装置を含めることにより改善できる（ただし、追加費用をかけて）が、伝送ファイバの分散を 10 ps/nm-km 未満に維持することが有利である。

【0006】制御しなければならない光伝送システムにおける光ファイバの別の特性は、信号波長での実効面積である（「実効面積」の詳しい説明は、Nonlinear Fiber Optics, Agrawal, Academic Press, 1995, second edition, pg. 43, Eq. 2.3.29を参照）。実効面積が増大すると、ファイバの分散ラマン増幅の効率が低下する。しかし、ファイバの実効面積が小さすぎると、他の非線形の光効果が大きくなり、光伝送システムのパフォーマンスを低下させる。したがって、伝送ファイバは、分散ラマン増幅の効率と、他の非線形効果によるシステムの

低質化とを均衡させる有効な面積を有していなければならない。

【0007】1990年代の始めに、単一の光ファイバ内での多数の波長での情報の伝送に関して実験が行われた。「四波混合」(FWM)として知られる(当該技術分野においては、四光子混合とも呼ばれる)非線形の光相互作用が、通信システムのパフォーマンスを制限し得ることが分かった。FWMにおいては、 ν_1 、 ν_2 および ν_3 ($\nu_1 \neq \nu_2$, ν_3) で示された3つの周波数が、ファイバの非線形性を介して相互作用し、新たな周波数 $\nu_4 = \nu_1 + \nu_2 - \nu_3$ を生成する。ラマン増幅されたシステムは信号波長で伝搬する情報信号を利用し、異なったポンプ波長で、強いポンプ信号(多重モード・ポンプ・レーザまたはいくつかの単一モードのポンプ・レーザからなる)を分離するので、FWMが発生する。四波混合の概念は文献においてはよく知られており、参考文献Optical Fiber Communications, IIIA, Kaminow and Koch, Academic Press, San Diego, 1997, 第8章において詳細に説明されている。四波混合の強さは、混合波長でファイバ分散を高めることにより、大幅に低下できることが知られている。非零分散移動ファイバ(NZ-DSF)として知られており、A. R. Chraplyvy 他に付与された米国特許第5,327,516号において開示された、新たな等級の光ファイバは、ファイバのZDWを1550nmから離して若干高いか低い波長に移動させ、それによって、それらの波長で少量の分散を付加する。しかし、NZ-DSFの現在のタイプは、1480~1510nmの波長範囲で分散ゼロを有する。

【0008】先行技術においてよく知られている別の非線形の光学的工程は、変調の不安定性である。この非線形の光学的工程において、非線形の屈折指数は、この工程がなければ位相不整合化されてしまったであろう、四波混合工程を位相整合する役割を果たす。その結果は、小さい正の値の群速度分散(D)に関する送り込まれた波長の周囲の側波帯の生成であり、ここで、側波帯の周波数オフセットは分散の減少と共に増加する。

【0009】

【発明が解決しようとする課題】将来のシステムにおいては、比較的高い強度のラマン源ならびに多数のラマン・ポンプ源を使用することが望ましいので、ラマン増幅光伝送システムにおいて、変調の不安定性および四波混合の効果を回避する装置を開発する必要がある。

【0010】

【課題を解決するための手段】先行技術に欠けている点は本発明によって解決される。本発明は、ラマン増幅光システムに関し、特に、変調の不安定性および四波混合効果の存在を削減するために、所定の分散特性を有する伝送ファイバを用いたラマン増幅光システムに関する。

【0011】本発明によれば、ラマン増幅光システムは、上記の効果を制限するために、予め決定されたセッ

トの制約によって定められた伝送ファイバを含むように形成されている。特に、本発明の伝送ファイバは、信号波長で、 10 ps/nm-km 未満の大きさの分散も示しながら、あらゆる所望のポンプ波長で、正ではない分散または $+1.5 \text{ ps/nm-km}$ よりも大きい分散の何れかを示すことにより、変調の不安定性を制限するように設計されている。分散(D)をこれらの領域に留まるように慎重に制御することにより、ポンプによって生成されたあらゆる連続帯(すなわち、側波帯)は、比較的狭く、大きいラマン増幅の領域から離れたままになることが分かった。そのため、この連続帯と関連づけられたあらゆる雑音構成要素は最小になる。

【0012】また、本発明によれば、四波混合(FWM)の存在は、伝送ファイバのゼロ分散波長(ZDW)が、ポンプ波長と、大きいラマン利得を得ているあらゆる信号波長との間の中央値にならないことを確実にすることにより削減される。ZDWがこれら2つの波長値のほぼ平均であるならば、ファイバの分散は、信号帯域内の周波数を有するFWM構成要素の位相整合を許容して、これらのFWM雑音構成要素が増幅されることを許容し、伝送信号の品質を低下させることが分かっている。

【0013】本発明によって形成されるラマン増幅器伝送ファイバおよび通信システムの更に別の特性は、以下の説明の中で、付属の図面を参照することにより明らかになるであろう。

【0014】

【発明実施の形態】本願は2000年3月3日出願の暫定出願第60/186/793号の利益を主張する。

【0015】図1は、伝送ファイバ14内で分散ラマン増幅を生成するために、逆伝搬ラマンポンプ源12を利用した例示的な通信システム10を示している。以下で詳細に説明する特定の条件の下で、ポンプ12から伝送ファイバ14に入る光波(「P」で示した)の存在は、最初にポンプと共伝搬し、図1に「I」で示した入力光波信号に対して逆伝搬する雑音構成要素を発生させる場合がある。これらの雑音構成要素は、ポンプ源12に最も近い20km以内のファイバにおいて、すなわち、ポンプ源12からの波Pが最も強いときに、顕著に生成される。これらの雑音構成要素は次に、ファイバ14の全長に沿って、レイリー後方散乱により反射される。また、離散的な反射が、伝送路(たとえば、ロータリ・スプライス)に沿って、様々な構成要素からのスパンにおいて生ずる。反射された雑音構成要素はラマン利得によって増幅され、光波信号(図1では「O」で示した)と共にシステムを出るので、システムのパフォーマンスを潜在的に低下させる。不要なポンプ・エネルギーが情報信号源に入ることを防止するために入力アイソレータ16を用いることができ、同様に、出力に残された無関係なポンプの量をできるだけ少なくするために、出力アイ

ソレータ18を用いることができる。

【0016】これらの雑音源を説明するために用いられる実験的配置20を図2に示した。図示したように、広帯域源22(LEDなど)からの出力は、ラマン利得と雑音指数とをプローブするために、「試験中のファイバ」24の一端に送り込まれる。分散ラマン利得を生成するために、ファイバ24の他端から、波長分割マルチプレクサ28を通して、「試験中のファイバ」24のスペン内にラマン・ポンプ26が送り込まれる(1450nmの波長で)。次に、図2に示したように、残存ポンプ光の光スペクトル、ラマン増幅自然放出(ASE)、および逆伝搬方向でスペンに存在するあらゆる生成雑音構成要素を計測するために、光タップ29および第1の光スペクトル分析器30が用いられる。(1)広帯域LED源22のみが「オン」になっている、(2)広帯域LED源22およびラマン・ポンプ26の両方が「オン」になっている、(3)ラマン・ポンプ26のみが「オン」になっているという3つの条件の下で、スペンの末端に存在する光スペクトルを計測するために、第2の光スペクトル分析器32が用いられる。スペクトル分析器32によって収集されるこれらの計測値を用いて、ラマン・オン/オフのスペクトルおよび実効雑音指数スペクトルを計算できる。全ての場合に、実効雑音指数は、「試験中のファイバ」24が波長分割マルチプレクサ28に接合される点と関連づけられる。一例において、計測値は、15dBから25dBの範囲にあるピーク・ラマン・オン/オフ利得について、2dBの増分で得られたものである。

【0017】図3～図5は、図2の試験配置20において敷設された、80kmの長さのTrueWave Minus(登録商標)ファイバ上で取られたデータのプロットである。このファイバは、約1600nmのZDWおよび $0.08\text{ps/nm}^2\text{-km}$ の分散勾配を示す。このファイバにおいて、1450nmのポンプ波長での分散はほぼ -12ps/nm-km である。図3には、15dBから25dBの範囲にあるピーク利得に関するオン/オフ・ラマン利得スペクトルを示した。図4は、光スペクトル分析器30(図2参照)によって捕らえられた残存ポンプ・スペクトルのプロットである。図示したように、図4における顕著な特徴は、1450nmでの残存ポンプおよび1550nm付近で生成されたラマン利得からのASEである。様々なラマン利得(光スペクトル分析器32によって捕らえられた)に関する実効雑音指数スペクトルを、図5に示した。図3から図5の全てにおける曲線は、先行技術を例示するものとみなされる。

【0018】図6から図8は、図2の試験配置20において敷設された、80kmの長さのTrueWave Plus(登録商標)ファイバで取られた類似のデータのプロットである。ポンプ源26に最も近い20kmの

長さのファイバは、約1500nmの平均ZDWおよび $0.07\text{ps/nm}^2\text{-km}$ の分散勾配を示している。このファイバにおいて、ポンプ波長(1450nm)での分散はおよそ -3.5ps/nm-km である。図6は、15dBから25dBの範囲にあるピーク利得に関するオン/オフ・ラマン利得スペクトルを示しており、ここで、これらのスペクトルは、従来の先行技術のファイバ・システム(図3参照)のスペクトルと類似である。図7に示したように、図4のスペクトルと比べて、残存ポンプ・スペクトルにおいて、1550nm付近の雑音強度に大きな上昇が見られる。この雑音の上昇は、図5の有効雑音指数スペクトルと比較して、図8にプロットした有効雑音指数スペクトルにおいても明らかに示されている。この雑音の発生源は、1450nm付近のポンプ波長内の四波混合(FWM)および1550nm付近の逆伝搬ラマンASEであることが分かっている。これらのFWM構成要素はラマン利得によって増幅されて、信号と同じ方向に伝搬するように後方散乱される。FWM雑音は、ポンプ周波数と、大きいラマン利得を得ているあらゆる周波数との平均である周波数で、伝送ファイバのZDWが発生するときは常に、信号内で発生することが分かっている。これらの条件の下で、伝送ファイバの分散は、FWM構成要素の成長を位相整合する役割を果たし、雑音構成要素が重大なレベルにまで増大することを許容する。波長について言えば、これは、ポンプ波長と大きいラマン利得を得ているあらゆる波長との平均にほぼ等しいゼロ分散波長に対応する。本発明の教示を理解するために、この効果を「FWM効果」と呼ぶことにする。

【0019】図9から図11は、80kmの長さのTrueWave Reduced Slope(登録商標)ファイバ上で取られたデータのプロットである。ポンプ源26に最も近い20kmの長さのファイバは、約1470nmのZDWおよび $0.047\text{ps/nm}^2\text{-km}$ の分散勾配を示している。このファイバにおいて、ポンプ波長での分散はほぼ -1.0ps/nm-km である。図10に示したように、「FWM効果」は1490nm付近でいくつかの雑音構成要素を生成するが、強度レベルは図7の値に比べて大幅に削減される(遙かに低いラマン利得のために)。ポンプ・スペクトルは、おそらくは位相整合がよくないFWMのために、非常に低い強度レベルで幾分か広がってしまうことに留意されたい。1500nmよりも大きい波長については、図10および図11の何れにおいても、「過度な」雑音特性は目立っていない。

【0020】図12から図14も、80kmの長さのTrueWave Reduced Slope(登録商標)ファイバで取られたデータのプロットであるが、この場合に、ポンプ源26に最も近い20kmの長さのファイバは、約1428nmのZDWと $0.042\text{ps/nm}^2\text{-km}$ の分散勾配を示している。

$\text{nm}^2 \cdot \text{km}$ の分散勾配を示している。このファイバにおいて、ポンプ波長での分散は約 $0.9 \text{ ps} / \text{nm} \cdot \text{km}$ である。図示したように、図13のプロットを図4のプロットと比較したときに、 1450 nm よりも大きい波長での残存ポンプ・スペクトルのプロットに大きな相違がある。 1550 nm でASEを介してポンプ波長から延びる比較的大きな雑音の連続帯も示されている。 1460 nm で生成されるピークもあり、ここで、この種の特徴は変調の不安定性を示している。本発明によれば、図13に示したように、このポンプ波長で非常に低い正のDの値についてこの連続帯が生成されるが、図10に示したように、このポンプ波長で非常に低い負のDの値については生成されないとすると、変調の不安定性は連続帯生成において重要な役割を果たすものと推測される。この説明のために、この効果を「連続帯効果」と呼ぶことにする。 23 および 25 dB のピーク利得について、 1530 nm 未満の波長でポンプによって生成される大きい雑音構成要素は、図12に示したのと同じ条件の下におけるオン／オフ利得の正確な計測を妨げることにより留意されたい。

【0021】図15から図17は 70 km の長さのファイバに関連づけられており、ここで、ポンプ源に最も近い 25 km は、約 1408 nm の平均ZDWおよび $0.39 \text{ ps} / \text{nm}^2 \cdot \text{km}$ の分散勾配を示している。このファイバにおいては、このポンプ波長での分散はほぼ $1.6 \text{ ps} / \text{nm} \cdot \text{km}$ である。図示したように、このポンプ波長でのより高い分散により、連続帯生成は、図12から図14に示したレベルから削減されるが、これは図4のプロットに比べて図17において特に顕著である。

【0022】図18から図20は 69 km の長さのファイバと関連づけられており、ここで、ポンプ源に最も近い 15 km は、約 1376 nm の平均ZDWと $0.037 \text{ ps} / \text{nm}^2 \cdot \text{km}$ の分散勾配を示している。このファイバにおいては、ポンプ波長での分散はほぼ $2.7 \text{ ps} / \text{nm} \cdot \text{km}$ である。ポンプ波長でのこのより高い分散によって、連続帯生成は上記の図15から図17に示したレベルから更に削減される。

【0023】図21から図25において、図5の実効雑音指数曲線（ここで、「FWM効果」および「連続帯効果」は完全にない）と、図8、11、14、17および20の実効雑音指数曲線との比較をそれぞれ行う。比較は、単に図5の値を上記の図における値から引いて、その結果をプロットすることにより行う（ここで、たとえば、図21は図5および図8においてプロットした値との差を表している）。最大の損失は「FWM効果」に起因し得ることが明らかであり、ここで、 14 dB のピーク損失が 25 dB のピーク・オン／オフ利得について図21に示されており、実質的な損失（ $> 1 \text{ dB}$ ）は 15 dB という低いピーク・オン／オフ利得について観察さ

れる。図22は、約 1470 nm のZDWのファイバにおいて、 1450 nm ポンプについて 1500 nm よりも大きい信号波長では、損失は全く計測され得ないことを示している。図23は、最大のオン／オフ利得について、特に、ポンプ波長に最も近い波長について、「連続帯効果」によって引き起こされることを示している。図24および図25は、「連続帯効果」から生ずる損失は、ポンプ波長での分散がより大きい値に高められるときに削減されることを示している。

【0024】したがって、これらの発見の全てに基づくと、変調の不安定性および四波混合と関連づけられた雑音構成要素の存在を削減するために、本発明に従って伝送ファイバ特性に関するパラメータ空間を定める。図26は、波長（ λ ）の関数としての群速度分散（D）で、このパラメータ空間の定義を示している。本発明の発見によれば、変調の不安定性の効果は、ファイバ分散Dを、可能なポンプ波長の範囲において正ではなく、または $1.5 \text{ ps} / \text{nm} \cdot \text{km}$ よりも大きくなるように維持することにより、伝送システム・ファイバにおいて削減される。図26を参照すると、図面において、「可能なポンプ波長の範囲」（P）は $\lambda_{p1} \sim \lambda_{p2}$ として示されており、それと関連づけられた回避する分散値は「D5」と符号を付した暗い部分で示されている。更に、あらゆる信号波長（図26において範囲 $\lambda_{s1} \sim \lambda_{s2}$ で示されている）で、分散Dの大きさは、不等式 $D2 < D < D1$ $\text{ps} / \text{nm} \cdot \text{km}$ または $D4 < D < D3$ $\text{ps} / \text{nm} \cdot \text{km}$ の何れかを満たす。ここで、これらの限界は、図面において領域D1、D2、D3およびD4で示されている。D2およびD3と示された有限な分散の限界は、上記で参照したChraplyvy他において教示されているように、WDMシステムにおいて信号波長のFWMを抑制するために必要である。一般的に、また、上記のような発見によれば、ポンプ波長で分散値が負であれば、変調の不安定性は生じない。これは、図13のプロット（ポンプ波長で比較的低い（ 0.9 ）の正の分散を有するファイバに関するもの）を、図7および図10のプロット（ポンプ波長で負の分散を有するファイバに関するもの）と比較することにより理解できる。代替的に、ポンプ波長でのファイバ分散が正であって $1.5 \text{ ps} / \text{nm} \cdot \text{km}$ よりも大きければ、最大利得の周波数移動は削減され、ポンプ生成連続帯の幅を狭める。しかし、信号波長で過大な分散値を有することには不利点がある。特に、これらの波長での大きい分散は分散補償を必要とし、これは高価になり得る。この最後の要因は、ポンプ波長の範囲における分散を制御することほど重要ではないが、システム全体のコスト・パフォーマンスの改善につながるであろう。D4よりも低い（すなわち、更に負の）分散を有する伝送ファイバは、満足なシステム・パフォーマンスのために必要とされるよりも小さい実効面積を特徴的に有している。

【0025】本発明の別の態様によれば、ゼロ分散波長（ZDW）がポンプ波長と大きいラマン利得を得る波長との間の中央値でないことを確実にすることにより、通信システムにおいて四波混合（FWM）は削減される。以下の関係は、伝送ファイバのゼロ分散周波数（ZD

$$\left[\frac{1}{2}(\nu_p + \nu_{\max}) - \frac{1}{2}\Delta\nu^- \right] \quad 10 \quad \left[\frac{1}{2}(\nu_p + \nu_{\max}) + \frac{1}{2}\Delta\nu^+ \right]$$

ここで、 ν_{\max} は周波数 ν_p の所与の単色ラマンポンプに関する最大ラマン利得の周波数として定義され、 $\Delta\nu^-$ は、利得係数が最大利得係数の半分である場合の周波数（ ν_{\max} よりも大きい）と ν_{\max} との間の差として定義され、 $\Delta\nu^+$ は、 ν_{\max} と、利得係数が最大利得係数の半分である場合の周波数（ ν_{\max} よりも小さい）との間の差として定義される。上記の関係は図27に図示されており、特に、図26および図27において領域を示す文字「E」として示されていて、ポンプ波長範囲とファイバZDWのために回避される信号波長範囲との間の特定の領域を示している。

【0026】この制約は、四波混合の生成物のいずれも信号波長範囲にはなく、したがって所望の情報信号と共に増幅を受けることがないことを確実にすることにより、FWMを大幅に削減する。実用上の光ファイバの設計に関する別の制約は、信号波長での実効面積が、他の非線形効果を抑制するために十分に大きいままでなければならないことである。

【0027】総括すれば、許容可能な分散値およびファイバZDWの範囲を制限すること、ならびに最小実効面積を制限することにより定められるパラメータ空間は、実施されたときに、変調の不安定性および四波混合からの雑音寄与が大幅に削減されたことを示すファイバ特性を定めることにつながる。正の分散勾配（F1で示した）と負の分散勾配（F2で示した）とを示す異なったファイバの例を図26に示した。このように、ファイバF1またはF2の何れかを伝送ファイバとして用いることにより（または、実際には、定められたパラメータ空間を満たす他のあらゆるファイバ）、これらの雑音構成要素はできるだけ小さくできる。

【0028】ポンプおよび情報信号の両方に関する好適な波長範囲を含む特定の実施形態を説明してきたが、本発明の主題は本明細書に添付の特許請求の範囲によってのみ限定されることを理解されたい。更に、信号波長での雑音増加の効果は理解されていないので、現在利用可能な光ファイバはここで権利請求している特性を備えておらず、また、権利請求している特性を示すファイバの製造は困難であると思われることを理解されたい。

【図面の簡単な説明】

【図1】逆伝搬ポンプ構造を用いて、分散ラマン増幅通信システムにおける雑音構成要素の生成を示した略図である。

F)でこのパラメータ空間を定義しており、ここでZDFのために回避する周波数の範囲は次の式によって定められる。

【数1】

$$\left[\frac{1}{2}(\nu_p + \nu_{\max}) - \frac{1}{2}\Delta\nu^- \right] \quad 10 \quad \left[\frac{1}{2}(\nu_p + \nu_{\max}) + \frac{1}{2}\Delta\nu^+ \right]$$

【図2】各種の送信ファイバ用の分散ラマン増幅器のパフォーマンスを評価するために用いられる、実験的配置の略図である。

【図3】オン/オフ・ラマン利得が、ポンプ「オン」での出力信号強度のポンプ「オフ」での出力信号強度に対する比率として定義されている場合の、入力ポンプ強度および公称平均ゼロ分散波長（ZDW）が1600である伝送ファイバの範囲にわたって、図2の配置で計測された、オン/オフ・ラマン利得スペクトルのプロットである。

【図4】図3の入力ポンプ強度および伝送ファイバの範囲にわたって、光スペクトル分析器で計測された、残存ポンプ光のプロットである。

【図5】実効雑音指数が計測雑音指数（増幅器が「オン」の状態）からファイバ自体に起因する受動的指数を引いた値として定義されている場合の、図3の配置の実効雑音指数スペクトルを示した図である。

【図6】オン/オフ・ラマン利得が、ポンプ「オン」での出力信号強度のポンプ「オフ」での出力信号強度に対する比率として定義されている場合の、入力ポンプ強度および公称平均ゼロ分散波長（ZDW）が1500である伝送ファイバの範囲にわたって、図2の配置で計測された、オン/オフ・ラマン利得スペクトルのプロットである。

【図7】図6の入力ポンプ強度および伝送ファイバの範囲にわたって、光スペクトル分析器で計測された、残存ポンプ光のプロットである。

【図8】実効雑音指数が計測雑音指数（増幅器が「オン」の状態）からファイバ自体に起因する受動的指数を引いた値として定義されている場合の、図6の配置の実効雑音指数スペクトルを示した図である。

【図9】オン/オフ・ラマン利得が、ポンプ「オン」での出力信号強度のポンプ「オフ」での出力信号強度に対する比率として定義されている場合の、入力ポンプ強度および公称平均ゼロ分散波長（ZDW）が1470である伝送ファイバの範囲にわたって、図2の配置で計測された、オン/オフ・ラマン利得スペクトルのプロットである。

【図10】図9の入力ポンプ強度および伝送ファイバの範囲にわたって、光スペクトル分析器で計測された、残存ポンプ光のプロットである。

50 【図11】実効雑音指数が計測雑音指数（増幅器が「オ

ン」の状態) からファイバ自体に起因する受動的指数を引いた値として定義されている場合の、図 9 の配置の実効雑音指数スペクトルを示した図である。

【図 12】オン/オフ・ラマン利得が、ポンプ「オン」での出力信号強度のポンプ「オフ」での出力信号強度に対する比率として定義されている場合の、入力ポンプ強度および公称平均ゼロ分散波長 (ZDW) が 1428 である伝送ファイバの範囲にわたって、図 2 の配置で計測された、オン/オフ・ラマン利得スペクトルのプロットである。

【図 13】図 12 の入力ポンプ強度および伝送ファイバの範囲にわたって、光スペクトル分析器で計測された、残存ポンプ光のプロットである。

【図 14】実効雑音指数が計測雑音指数 (増幅器が「オン」の状態) からファイバ自体に起因する受動的指数を引いた値として定義されている場合の、図 12 の配置の実効雑音指数スペクトルを示した図である。

【図 15】オン/オフ・ラマン利得が、ポンプ「オン」での出力信号強度のポンプ「オフ」での出力信号強度に対する比率として定義されている場合の、入力ポンプ強度および公称平均ゼロ分散波長 (ZDW) が 1408 である伝送ファイバの範囲にわたって、図 2 の配置で計測された、オン/オフ・ラマン利得スペクトルのプロットである。

【図 16】図 15 の入力ポンプ強度および伝送ファイバの範囲にわたって、光スペクトル分析器で計測された、残存ポンプ光のプロットである。

【図 17】実効雑音指数が計測雑音指数 (増幅器が「オン」の状態) からファイバ自体に起因する受動的指数を引いた値として定義されている場合の、図 15 の配置の実効雑音指数スペクトルを示した図である。

【図 18】オン/オフ・ラマン利得が、ポンプ「オン」での出力信号強度のポンプ「オフ」での出力信号強度に対する比率として定義されている場合の、入力ポンプ強度および公称平均ゼロ分散波長 (ZDW) が 1376 である伝送ファイバの範囲にわたって、図 2 の配置で計測された、オン/オフ・ラマン利得スペクトルのプロットである。

【図 19】図 18 の入力ポンプ強度および伝送ファイバの範囲にわたって、光スペクトル分析器で計測された、残存ポンプ光のプロットである。

【図 20】実効雑音指数が計測雑音指数 (増幅器が「オン」の状態) からファイバ自体に起因する受動的指数

を引いた値として定義されている場合の、図 18 の配置の実効雑音指数スペクトルを示した図である。

【図 21】入力ポンプ強度の範囲にわたって、公称平均 ZDW が 1500 nm (図 8) および 1600 nm (図 5) であるファイバ上で計測された、実効雑音指数の差 (デシベル) のプロットである。

【図 22】入力ポンプ強度の範囲にわたって、公称平均 ZDW が 1470 nm (図 11) および 1600 nm (図 5) であるファイバ上で計測された、実効雑音指数の差 (デシベル) のプロットである。

【図 23】入力ポンプ強度の範囲にわたって、公称平均 ZDW が 1428 nm (図 14) および 1600 nm (図 5) であるファイバ上で計測された、実効雑音指数の差 (デシベル) のプロットである。

【図 24】入力ポンプ強度の範囲にわたって、公称平均 ZDW が 1408 nm (図 17) および 1600 nm (図 5) であるファイバ上で計測された、実効雑音指数の差 (デシベル) のプロットである。

【図 25】入力ポンプ強度の範囲にわたって、公称平均 ZDW が 1376 nm (図 20) および 1600 nm (図 5) であるファイバ上で計測された、実効雑音指数の差 (デシベル) のプロットである。

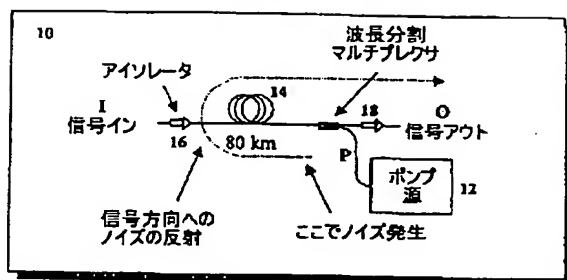
【図 26】本発明により変調の不安定性および四波混合の効果を削減するために回避される波長の関数として様々な分散領域を示す、群速度分散 (D) 対波長 (λ) のプロットである。

【図 27】本発明により変調の不安定性および四波混合の効果を削減するために回避される特定の周波数を示す、ポンプ周波数と信号周波数との間の関係のプロットである。

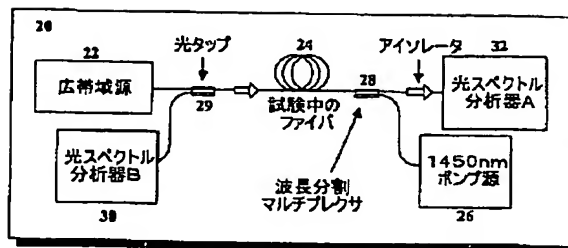
【符号の説明】

- 12 逆伝搬ラマンポンプ源
- 14 伝送ファイバ
- 16 入力アイソレータ
- 18 出力アイソレータ
- 22 広帯域源
- 24 試験中のファイバ
- 26 ラマン・ポンプ
- 28 波長分割マルチプレクサ
- 29 光タップ
- 30 第 1 の光スペクトル分析器
- 32 第 2 の光スペクトル分析器

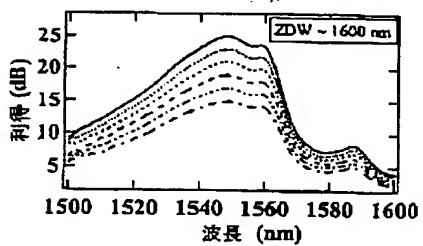
【図 1】



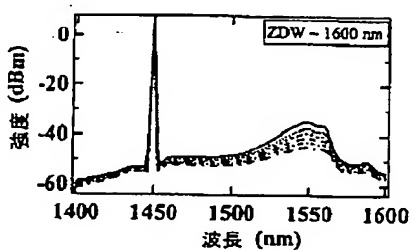
【図 2】



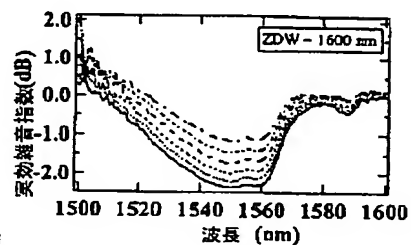
【図 3】



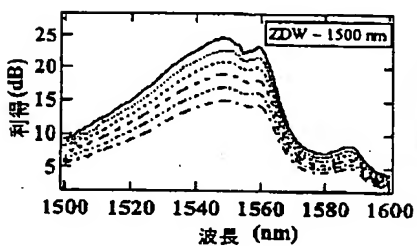
【図 4】



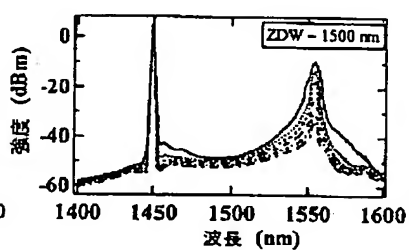
【図 5】



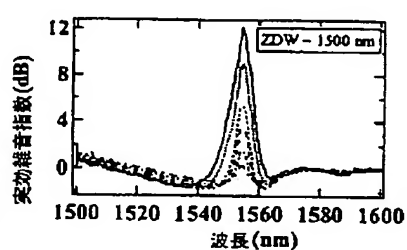
【図 6】



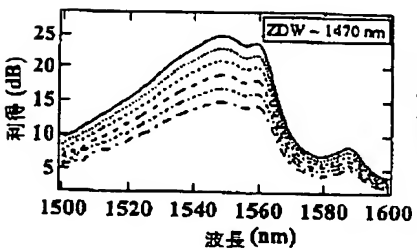
【図 7】



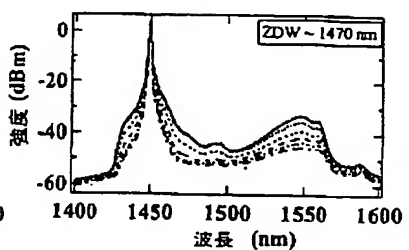
【図 8】



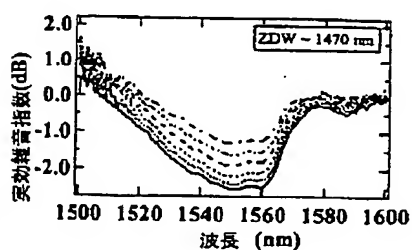
【図 9】



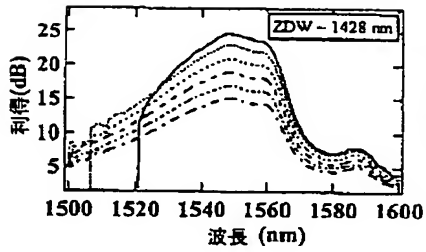
【図 10】



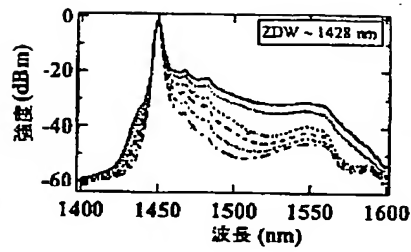
【図 11】



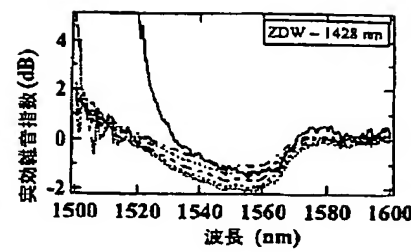
【図 12】



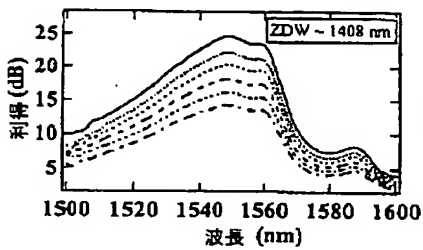
【図 13】



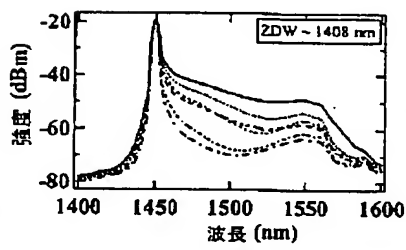
【図 14】



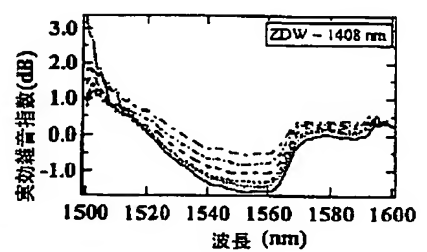
【図 15】



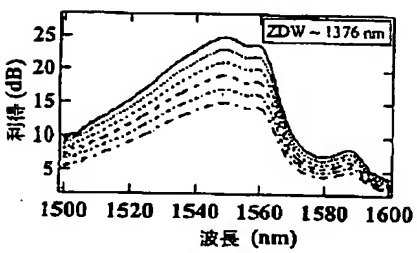
【図 16】



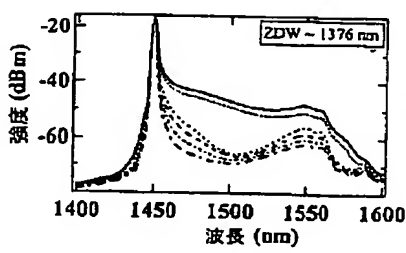
【図 17】



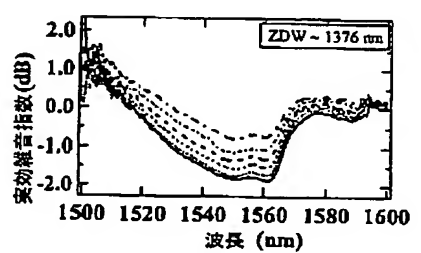
【図 18】



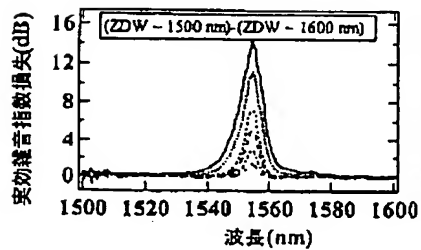
【図 19】



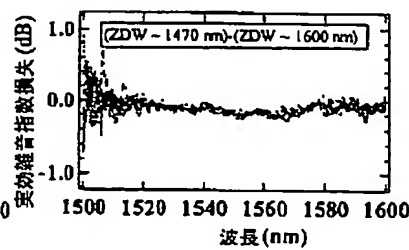
【図 20】



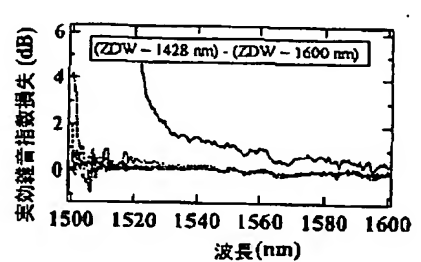
【図 21】



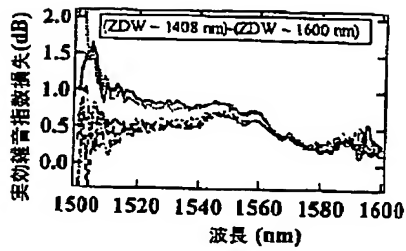
【図 22】



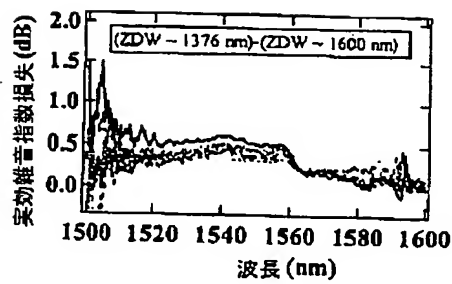
【図 23】



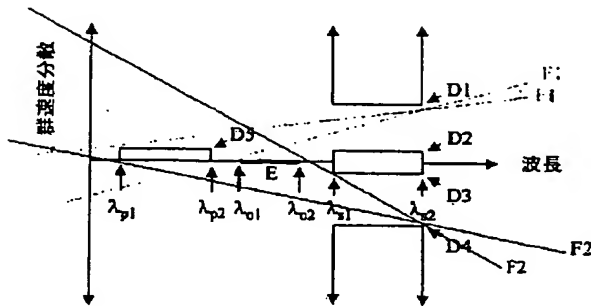
【図 24】



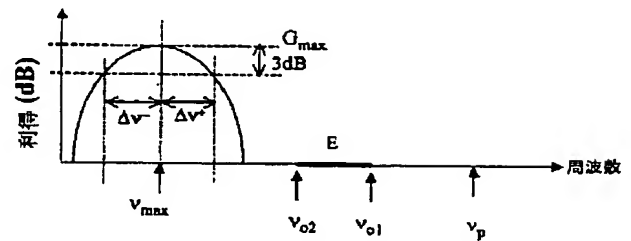
【図 25】



【図 26】



【図 27】



フロントページの続き

(72)発明者 ロバート ビー. リー
アメリカ合衆国 07748 ニュージャージー
イ, ミドルタウン, クノールウッド ドラ
イヴ 1905

(72)発明者 セオ ワイ. パーク
アメリカ合衆国 07726 ニュージャージー
イ, マナラパン, ドリュウ コート 35

(72)発明者 ウィリアム アルフレッド リード
アメリカ合衆国 07901 ニュージャージー
イ, サミット, ブラックバーン ロード
143

(72)発明者 アンドリュー ジョン ステンツ
アメリカ合衆国 08809 ニュージャージー
イ, クリントン, グースタウン ドライヴ

9

F ターム(参考) 2H050 AC71

2K002 AA02 AB30 BA01 DA10 GA10
HA23

5F072 AK06 JJ05 MM03 PP01 QQ07
RR01 YY17